

基于激光扫描法布里-珀罗干涉原理的 压电常数测试系统¹⁾

童 悦²⁾ 马建国

(淮南师范学院物理与电子信息系, 安徽淮南 232001)

摘要 提出了由扫描法布里-珀罗干涉法测量微小形变的方法, 设计了一种基于激光扫描法布里-珀罗干涉原理的压电常数 d_{31} 测试系统. 文中给出了测量原理、测量装置及陶瓷样本的测量结果, 并与用 IEEE 标准测量方法的测量结果进行了对比, 测试结果表明两者相差很小.

关键词 扫描法布里-珀罗干涉仪, 微小形变, 压电常数

中图分类号: O439 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2011)05-042-04

A TESTING SYSTEM FOR PIEZOELECTRIC CONSTANTS BASED ON THE PRINCIPLE OF LASER SCANNING FABRY-PEROT INTERFEROMETER¹⁾

TONG Yue²⁾ MA Jianguo

(Department of Physics and Electronic, Huainan Normal University, Huainan 232001, China)

Abstract Based on a method of measuring tiny deformation by scanning Fabry-Perot interferometer, a testing system for piezoelectric constants is proposed. In this paper, we discuss the measuring principle, the measuring apparatus, and experimental results for a typical example. The piezoelectric constants obtained by this method are in very good agreement with the experiment data by the IEEE method.

Key words Fabry-Perot scanning interferometer, tiny deformation, piezoelectric constant

压电常数 d_{ij} 是压电陶瓷材料的一个非常重要的性能参数^[1-2], 它的定义为

$$d_{ij} = \frac{\partial S_j}{\partial E_i} \quad (1)$$

式中, d_{ij} 是在 i 方向上加一单位电场时在 j 方向产生的应变大小. 对于钙钛矿结构的压电陶瓷 d_{33} , d_{31} 是两个独立的重要参量. 对于 d_{33} 已有成熟的仪器可直接测量. 对于 d_{31} 的确定, 则采取“动态线路传输法”^[3]、“准静态测量法”、“静态法”等 IEEE 标准测量方法进行测量.

如“动态线路传输法”需测出样品的谐振频率、反谐振频率和第一谐波频率, 测出样品在机械自由

状态下的电容, 计算出其介电常数 ϵ_{33} 、机电耦合系数 K_{31} 和柔顺系数 S_{11} , 最后, 由下式计算出 d_{31} .

$$d_{31} = K_{31} \sqrt{S_{11} \epsilon_{33}} \quad (2)$$

这种采用电学的方法进行的间接测量, 测量工序多, 计算也比较复杂, 很容易带来一些不应出现的误差.

由于压电陶瓷材料的压电应变常数 d_{31} 的量级是 10^{-10}CN^{-1} , 由式 (1) 具体分析可知, 加上外电场后, 样品的应变是很小的 (通常量级为 10^{-6}m). 于是, 作者尝试用激光干涉的方法来测量微小应变, 提出了一种基于扫描法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 干涉原理的压电形变的测量方法.

2010-10-05 收到第 1 稿, 2011-07-05 收到修改稿.

1) 安徽省教育厅自然科学研究计划资助项目 (KJ2008B019).

2) 童悦, 1973 年生, 男, 高级实验师, 研究方向为无铅压电陶瓷. E-mail: tongyue99@163.com

1 系统组成

测量系统由激光源，信号发生器，扫描 F-P 干涉仪及数字存储示波器组成 [5]，系统结构如图 1 所示。

反射镜 1 与反射镜 2 相互平行，组成 F-P 干涉系统。根据光学理论 [4]，F-P 干涉仪的输出光强为

$$I = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}} I_0$$

式中， R 为反射镜的反射率， I_0 为输入光强， φ 为相位角， $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot nd \cos i$ ， n 是折射率， d 是干涉腔的长度， i 为入射角。当位相差 $\varphi = 2k\pi$ ($k = \pm 1, \pm 2, \dots$) 时，透射光的光强为极大值，即得干涉仪基本方程为 $2dn \cos i = k\lambda$ ($k = \pm 1, \pm 2, \dots$)。

将反射镜 1 粘贴于一压电换能器件 (PZT) 上，并在 PZT 上加一定幅度的锯齿波电压，在锯齿波电压的驱动下，PZT 带动反射镜一起做周期线性伸缩，

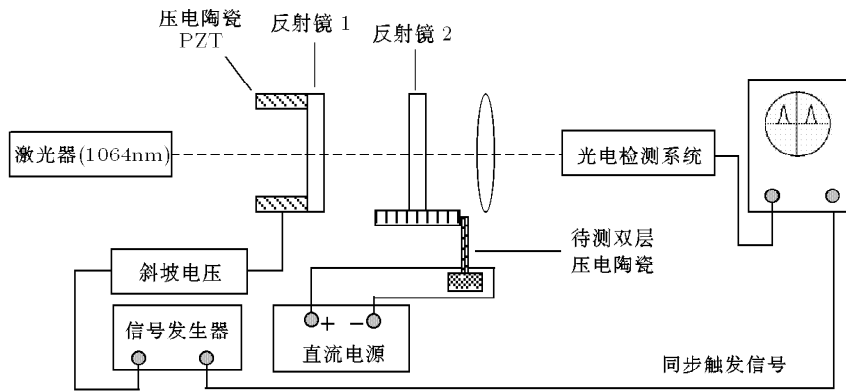


图 1 扫描法布里-珀罗干涉压电常数测试系统

从而实现了 F-P 干涉仪腔长的周期性控制 [5]。透射光光强的变化由光电倍增管转换为光电流信号，由数字存储示波器进行观察和记录。调节锯齿波扫描电压，使腔长变化稍大于一个波长。当 $2nd = k\lambda$ 时，发生透射极大，这样得到的归一化强输出如图 2 所示，虚线表示对应的扫描锯齿波电压。在示波器中可观察到两个扫描波峰，设此时两峰间的距离为 d_0 ，如图 3 实线所示。

将反射镜 2 与待测压电陶瓷片粘合在一起，当外加一个直流电压 U 时，逆压电效应会使反射镜 2

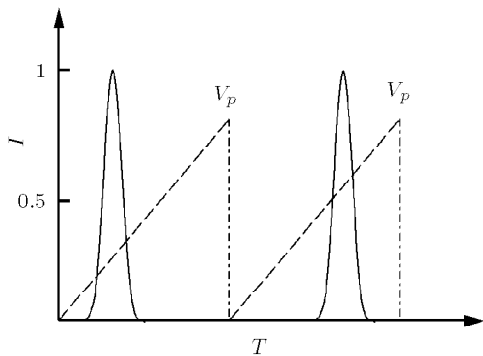


图 2 扫描光强输出

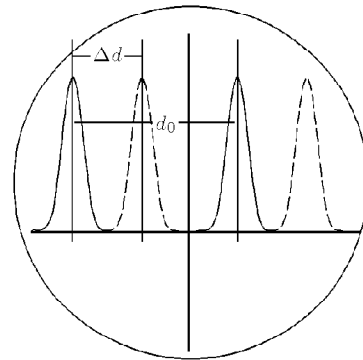


图 3 扫描干涉明纹示波屏图样

产生一个微小的位移 δ 。由于干涉腔的长度改变，透射光的归一化光强输出的位相将发生变化。这样，波峰会在示波屏上移动一段距离 Δd ，如图 3 所示。由干涉原理可得

$$\delta = \frac{\Delta d \lambda}{d_0 2}$$

δ 即为在外电场作用下，压电陶瓷所产生的应变。

2 压电常数 d_{31} 与干涉信号之间关系的建立

压电陶瓷在外加电场作用下的应变是沿 Z 轴正负两个方向的，且需要在自由状态下测量。以上方

法仅能实现单方向上的微小形变量的测量, 测量结果存在很大的误差. 为了解压电陶瓷双向伸展的问题, 将 2 个扁平条状压电陶瓷粘在一起, 制成一个复合陶瓷片 (压电双晶片), 双晶片上施加电场的极性如图 4.

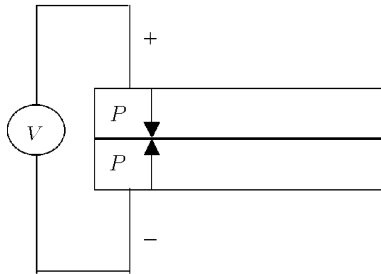


图 4 双晶片示意图

将压电双晶片一端夹持 (如图 5), 另一端自由伸展. 设组成双晶片的 2 片陶瓷完全相同, 每片长为 l , 宽为 w , 厚为 h , 并假定 $l \gg w, l \gg h$. 当外加电压 V 时, 压电双晶片内部电场 $E = -V/2h$. 由于压电材料的逆压电效应, 压电双晶片将产生形变. 上片极化方向与 E 相同, 下片极化方向与 E 相反, 从而导致上片收缩、下片伸长, 造成压电双晶片向上弯曲. 根据压电理论有^[2]

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{ni} E_n$$

$$D_m = d_{mj} T_j + \varepsilon_{mn}^T E_3$$

其中, $i, j = 1, 2, \dots, 6; n = 1, 2, 3; S_i$ 为应变张量; T_j 为应力张量; E_n 为电场; D_m 为电位移; ε_{mn}^T 为恒应力时的介电常数; d_{mj} 为压电常数; s_{ij}^E 为恒定电场下的柔顺系数.

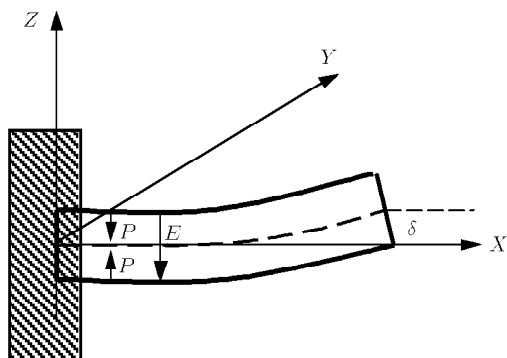


图 5 压电陶瓷复合片外加电压时弯曲图形

根据 S, T 的对称性, 对压电双晶片, 在垂直方向的伸缩是自由的, 即 $T_3 = 0$; 又因压电双晶片可看为细长的, 故可假定 y 方向的应力 $T_2 = 0$; 因极化

方向与电场方向不垂直, 所以不存在剪切力; 这样不为 0 的应力分量只有 T_1 . 当外加电压如图 4 所示的极性时, 上片中的电场 E 极性为正, 下片为负; 电位移 D 是吉伯斯自由能对电场 E 的导数, 而吉伯斯自由能为正值, 所以 D 与 E 方向一致. 因此对双陶瓷片的上片而言, 压电方程可简化为

$$S_1^U = s_{11}^E T_1^U + d_{31} E_3$$

$$D_3^U = d_{31} T_1^U + \varepsilon_{33}^T E_3$$

式中, 上标 U 表示上片; 下标 1,2,3 分别表示 x, y, z 方向. 对下片, 压电方程写为

$$S_1^L = s_{11}^E T_1^L - d_{31} E_3$$

$$-D_3^L = d_{31} T_1^L - \varepsilon_{33}^T E_3$$

式中, 上标 L 表示下片.

图 5 所示的外加电压极性将导致双晶片产生一向上的弯曲, 使其自由端有一偏移量 δ . 弯曲的双晶片处于平衡状态时, 用 F^U, F^L 表示力, M^L, M^U 表示弯矩. 因 x 方向不存在位移, 有 $F^U = F^L$. 因上片晶片的最下层产生的应变与下片晶片的最上层产生的应变相同, 即

$$\begin{aligned} -\frac{F s_{11}^E}{wh} - \frac{h M^U}{2EI} + d_{31} E_3 &= \\ \frac{F s_{11}^E}{wh} + \frac{h M^L}{2EI} - d_{31} E_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

EI 是每片晶片的弯曲刚度. 两片晶片的曲率半径相同, 即 $R_U = R_L$, 且

$$\frac{1}{R} = \frac{M^U}{EI} = \frac{M^L}{EI} \quad (4)$$

因上下两压电陶瓷片除极化方向外其他参数均相等, 由式 (4) 可得

$$M^U = M^L = M$$

$$M^U + M^L = 2M = 2Fh$$

即

$$M = \frac{Fh}{2} \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (3) 可得

$$F \left(\frac{s_{11}^E}{wh} + \frac{h^2}{4EI} \right) = d_{31} E_3 \quad (6)$$

将 $E = \frac{1}{s_{11}^E}, I = \frac{wh^3}{12}$ 代入式 (6) 可得

$$F = \frac{d_{31} E w h^2}{4 s_{11}^E} \quad (7)$$

由式 (5), 式 (7) 得

$$M = \frac{d_{31}Ewh^2}{8s_{11}^E} \quad (8)$$

由式 (4) 及挠曲线近似微分方程 $EIz'' = M$ 可推出曲率 $1/R^{[6]}$ 即

$$z'' = \frac{3d_{31}E_3}{2h} \quad (9)$$

对式 (9) 两次积分得

$$z = \frac{3d_{31}E_3x^2}{4h} \quad (10)$$

式 (10) 给出了任意位置 x 处的偏移量 z 的大小, 双悬臂梁的自由端 $x = l$ 处的偏移量 δ 为

$$\delta = \frac{3d_{31}E_3l}{4h} = \frac{3d_{31}lV}{8h^2} \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出, 测出压电双晶片的几何尺寸 l , h , 外加直流电压 V , 悬臂梁式压电陶瓷片自由端的偏移量 δ , 即可得出压电双晶片的压电应变常数 d_{31}

$$d_{31} = \frac{8h^2}{3l} \frac{\delta}{V} \quad (12)$$

因压电陶瓷片自由端的偏移量 δ 是单向伸展的, 这个量可用扫描法布里-珀罗干涉系统比较准确地测出.

3 测量与分析

如图 1 所示将反射镜 2 安装在一滑块上, 待测压电陶瓷双晶片的远端与滑块相连, 当外加一个直流电压 V 时, 由以上讨论知, 其远端必然产生一个微小的位移 δ , 这个位移的大小等于滑块移动的距离, 即干涉腔长度变化值. 依据以上讨论结果可计算出 δ , 从而实现了压电常数 d_{31} 的精确测量.

用传统的固相合成法合成制作了 NKN 基无铅压电陶. 采用准静态测量的方法^[7], 测得该压电陶瓷片的 $d_{31} = 81 \text{ pC/N}$ (此为参照值). 用该种陶瓷材料做成压电双晶片, 利用自制的扫描 F-P 干涉系统, 测量该双晶片在一定电压作用下, 远端的形变量. 测量数值及计算结果见表 1. 由表 1 可以看出, 测量值与参照值基本一致.

表 1 不同样品的测量结果

样品 编号	l/mm	h/mm	电压 /v	$\frac{\Delta d}{d_0}$	δ/mm	$d_{31}/$ (pC·N ⁻¹)
1	10.31	1.47	3.0	0.83	0.445 5	82.3
2	10.42	1.46	3.0	0.82	0.417 9	79.3
3	10.12	1.52	3.0	0.78	0.389 2	84.2
4	10.15	1.48	3.0	0.75	0.453 5	76.5
5	10.54	1.47	3.0	0.82	0.428 1	79.5

4 结 论

(1) 提出的利用激光扫描法布里-珀罗干涉系统来测量自制压电常数 d_{31} 的方法是可行的.

(2) 不同编号样品的 d_{31} 的差别主要是由于样品材料参数本身的分散性引起的.

(3) 与“动态线路传输法”、“准静态测量法”等方法相比较, 利用激光扫描法布里-珀罗干涉系统来测量测压电陶瓷的压电常数, 原理更直观、设备简单、操作容易.

参 考 文 献

- 张沛霖, 钟维烈等. 压电材料与器件物理. 北京: 科学技术出版社, 1997. 4
- 张沛霖, 张仲渊. 压电测量. 北京: 国防工业出版社, 1983
- 李远, 秦自楷, 周志港. 压电与铁电材料的测量. 北京: 科学出版社, 1994
- 姚启钧. 光学教程. 北京: 高等教育出版社, 2008. 45-50
- 马建国, 张学勇. 基于激光扫描 F.P. 干涉原理的线胀系数测试仪. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004, 27: 1326-1329 (Ma Jianguo, Zhang Xueyong. Instrument for measuring the linear thermal expansion coefficient based on the principle of laser scanning F.P. interferometer. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2004, 27(10): 1326-1329 (in Chinese))
- 叶会英, 禹延光. 一种实用的压电常数测试系统及测试精度分析. 电子元件与材料, 2004, 23: 46-50 (Ye Huiying, Yu Yan-guang. Practical test system and its precision analysis of piezoelectric constant d_{31} with piezoelectric bimorphs. *Electronic Components and Materials*, 2004, 23: 46-50 (in Chinese))
- GB11309-1989. 压电陶瓷材料性能测试方法, 纵向压电应变常数 d_{33} 的准静态测试. 北京: 机械电子工业部电子标准化研究所, 1990

(责任编辑: 刘俊丽)